МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9:531.3 10.23947/1992-5980-2017-17-3-14-26

Влияние производства тепла на динамику процесса резания*

В. Л. Заковоротный[1], И. А. Винокурова[2]**
[1, 2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Effect of heat generation on dynamics of cutting process ***

V. L. Zakovorotny[1], I. A. Vinokurova[2]**
[1, 2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Один из механизмов, вызывающих потерю устойчивости равновесия в динамической системе резания, обусловлен зависимостью сил от скорости обработки. В свою очередь, зависимость сил от скорости объясняется изменением температуры, связанным с выделением энергии в зоне резания. Необратимые преобразования в зоне резания (и, следовательно, температура) не только влияют на физико-механические характеристики материала зоны резания, но и приводят к образованию различных диссипативных структур, формируемых в областях первичной пластической деформации и контакта передней поверхности инструмента со стружкой. При этом все изменения свойств зоны резания, зависящие от производства тепла и теплообмена, происходят во времени.
Материалы и методы. Приводится математическая модель системы, рассматривается проблема влияния термодинамической подсистемы на устойчивость траекторий формообразующих движений и на притягивающие множества, формируемые в окрестности этих траекторий. Также приводятся примеры влияния термодинамической подсистемы на динамику системы резания в целом.
Результаты исследования. Во всех известных работах динамическая система резания рассматривалась как механическая подсистема, координаты состояния которой никак не зависели от координат термодинамической подсистемы. В отличие от этих работ в статье приводятся результаты изучения взаимосвязанных термодинамической и механической подсистем. Главное внимание уделяется свойствам динамической системы резания. Рассмотрено изменение этих свойств в зависимости от переходных процессов в механической и термодинамической подсистемах. Показана их взаимосвязь через изменение параметров, зависящих от температуры. Принимается во внимание изменение давления стружки на переднюю поверхность инструмента, обусловленное необратимыми преобразованиями энергии в зоне резания. Учитываются также температурные деформации инструмента. Таким образом, рассматривается взаимное влияние механической и термодинамической подсистем.

Introduction. One of the mechanisms causing the loss of balance stability in the dynamic cutting system is specified by the forces-processing speed relation. Again, the forces-speed relation is explained by the temperature variation associated with the release of energy in the cutting zone. Irreversible transformations in the cutting area (and, consequently, the temperature) not only affect the stress-strain behavior of the cutting zone material, but results in the formation of various dissipative structures in the primary plastic flow areas, and the tool face-turnings contact. In this case, all changes in the cutting area properties depending on the heat generation and transfer occur in the course of time.
Materials and Methods. A system mathematical model is given; the problem of the thermodynamic subsystem effect on the forming movement trajectories stability and on the attracting sets made up in the neighborhood of these trajectories is considered. And examples of the thermodynamic subsystem effect on the cutting system dynamics in general are given.
Research Results. In all well-known papers, the dynamic cutting system is examined as a mechanical subsystem which coordinates of state in no way depend on the coordinates of the thermodynamics subsystem. In contrast to the known studies, the results of investigating interconnected thermodynamic and mechanical subsystems are given here. The primary focus is on the dynamic cutting system properties. The change in these properties is considered depending on the transient processes in the mechanical and thermodynamic subsystems. Their interrelation is shown through the change in parameters depending on temperature. The variation of chipping pressure on the tool face caused by irreversible energy transformations in the cutting area is taken into account. Besides,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания 9.77-22.2017/БЧ: «Разработка теории синергетического управления процессом резания с учетом влияния термодинамики».
** E-mail: vzakovorotny@dstu.edu.ru, irina_24032011@mail.ru
*** The research is done within the frame of Government task no. 9.77-22.2017/БЧ: "Development of the synergetic control theory of the cutting process with account of thermodynamics effect".

Обсуждение и заключения. Необратимые преобразования, подводимые к зоне резанья могут существенно влиять на такие свойства процесса обработки как устойчивость точки равновесия, а также на формируемые в ее окрестности различные притягивающие множества.. При этом точка равновесия динамической системы резанья рассматривается в подвижной системе координат движения, которой определяется управляемыми траекториями исполнительных элементов станка. Как точка равновесия, так и притягивающие множества характеризуют упругие деформационные смещения вершины режущего инструмента относительно обрабатываемой детали в точке контакта с ней инструмента. Поэтому при потере устойчивости, формируемые притягивающие множества непосредственно влияют на параметр качества изготовляемой детали. Учет термодинамических процессов позволяет не только повысить достоверность изучения динамической системы резанья, но и открыть новые не рассматриваемые ранее, направления стабилизации процесса обработки.

Ключевые слова: процесс точения, устойчивость, притягивающие множества, термодинамическая и механическая подсистемы.

Образец для цитирования: Заковоротный, В. Л. Влияние производства тепла на динамику процесса резания / В. Л. Заковоротный, И. А. Винокурова// Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 14–26.

temperature tool deformations are considered. Thus, interference of the mechanical and thermodynamic subsystems is examined.

Discussion and Conclusions. Irreversible transformations applied to the cutting area can significantly affect the processing properties, such as balance point stability, as well as various attracting sets formed in its vicinity. Here, the balance point of the dynamic cutting system is considered in the moving coordinates which are determined by the controlled trajectories of the machine executive elements. Both the balance point and the attracting sets characterize elastic deformation shifts of the cutting tip against the workpiece in its contact point with the tool. Therefore, under instability, the formed attracting sets directly affect the workpiece quality parameter. Considering thermodynamic processes allows not only to increase validity of studying the dynamic system of cutting, but also to develop new approaches to the treatment process control.

Keywords: turning process, stability, attracting sets, thermodynamic and mechanical subsystems.

For citation: V.L. Zakovorotny, I.A. Vinokurova. Effect of heat generation on dynamics of cutting process. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 14–26.

Введение. Проблемы динамики процесса резания являлись предметом многочисленных исследований [1–10]. Изучению подлежала механическая система, состоящая из взаимодействующих через процесс обработки подсистем инструмента и обрабатываемой детали. Свойства процесса резания обусловлены его динамической связью, которая определяет модель сил в координатах состояния [11, 12]. Описаны основные механизмы потери устойчивости равновесия в системе. Их действие объясняется запаздыванием вариаций сил по отношению к деформационным смещениям [2–4], а также особенностями зависимости сил от скорости резания [11–14]. Анализировалось также влияние на устойчивость следа от инструмента на обработанной части детали на предыдущем обороте [15]. Показано, что при рассмотрении линеаризованного уравнения в вариациях относительно равновесия системы оба этих механизма имеют одну природу [4–6]. Зависимость же сил от скорости, как и существование запаздывания, во многом объясняется изменениями температуры в зоне резания. С изменениями температуры связывают вариации физико-механических свойств материала в зоне резания и формирование диссипативных структур — например, нароста или застойной зоны.

Постановка проблемы. Во всех известных работах переходные процессы в термодинамической системе не представлены. В статье, в отличие от ранее выполненных исследований, рассматривается система резания, состоящая из двух взаимосвязанных динамических подсистем: механической и термодинамической. Эта взаимосвязь изменяет динамические свойства системы.

Обоснование математической модели. При изучении физических систем возможны различные уровни представлений: микро-, мезо- и макроуровни. Здесь ограничимся моделированием на макроуровне, согласно которому механическую и термодинамическую подсистемы представим конечномерными динамическими структурами. Будем рассматривать на макроуровне две подсистемы: механическую и термодинамическую. Для моделирования механической подсистемы воспользуемся гипотезами, проанализированными ранее [11–14]. Рассмотрим продольное точение инструментом, имеющим главный угол в плане $\varphi = \pi / 2$ (рис. 1).

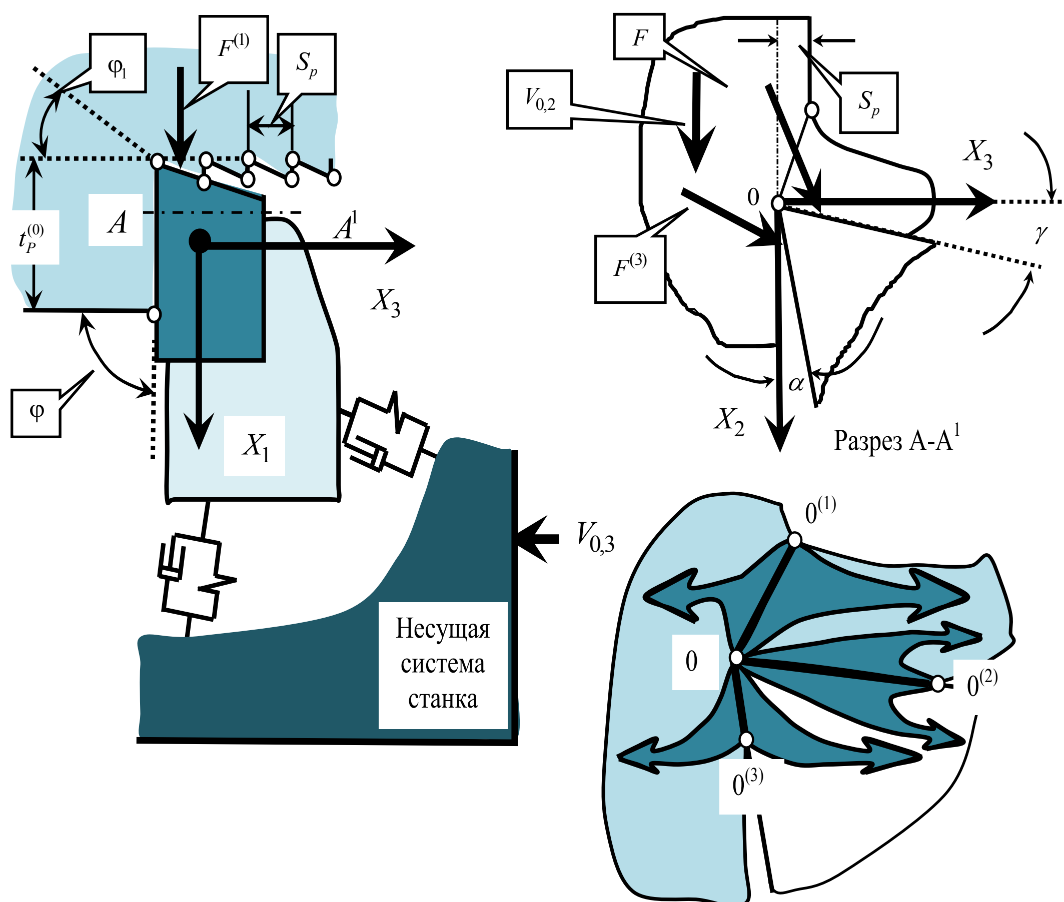


Рис. 1. Ориентация осей деформационных смещений и сил, действующих на режущий инструмент и обрабатываемую деталь

Fig. 1. Positioning of deformation displacement axes and forces affecting cutting tool and workpiece

Начало координат рассматривается в точке контакта вершины инструмента с обрабатываемой деталью в предположении, что упругие деформации отсутствуют. Будем рассматривать только деформации инструмента $X = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \Re^3$. Тогда при силах резания $F_\Sigma(t)$ деформации вершины инструмента определяются

$$m\frac{d^2X}{dt^2} + h\frac{dX}{dt} + cX = F_\Sigma(t), \tag{1}$$

где $m = \lfloor m_{s,k} \rfloor, m_{s,k} = m, при: s = k,\ m_{s,k} = 0, при: s \neq k,\ \ s,k = 1,2,3$ в кгс^2/мм, $h = \lfloor h_{s,k} \rfloor, s,k = 1,2,3$ в кгс/мм, $c = \lfloor c_{s,k} \rfloor, s,k = 1,2,3$ в кгс/мм — симметричные и положительно определенные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов; $F_\Sigma(t) = F(t) + F^{(1)}(t) + F^{(3)}(t)$; $F(t) = F_0\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$ — силы, действующие на переднюю поверхность инструмента; $F^{(1)}(t) = F_0^{(1)}(t)\{1,0,0\}^T$, $F^{(3)}(t) = F_0^{(3)}(t)\{0,0,1\}^T$ — силы, действующие на задние грани инструмента, и ограничивающие развитие периодических движений инструмента относительно детали (рис. 1).

Будем пользоваться синергетической концепцией анализа [14, 16], согласно которой необходимо силы F_Σ представить в координатах состояния. Кроме сил, формируемых в области передней грани F, учтем силы, действующие на задние грани $F^{(1)}$ и $F^{(3)}$ (рис. 1). Параметры подсистем определяются по правилам, изложенным, например, в [17, 18].

Для определения F_0 принята гипотеза [11–14]: силы пропорциональны площади срезаемого слоя. При моделировании взаимосвязи механической и термодинамической подсистем учтем: коэффициент $\rho_0(\Xi)$, имеющий смысл давления стружки на переднюю поверхность инструмента, зависит от температуры Ξ; в инструменте имеются температурные деформации $X_{1,\theta}$, которые рассматриваются только в направлении X_1. Тогда

$$F_0\ (t) = \rho_0(\Xi)\{t_P^{(0)} + X_{1,\theta}(t) - X_1(t)\}\{\int_{t-T}^{t}[V_{3,0} - v_3(\xi)]d\xi\}, \tag{2}$$

где $t_P^{(0)}$ — величина припуска (в [мм]) без учета упругих и тепловых деформаций; $V_{3,0}$ — скорость продольной подачи; $v_3(\xi)$ — скорость упругих деформаций в направлении подачи; $X_{1,\theta}(t) = k_\theta^{(X)} \Xi$ — температурная деформация инструмента, отличающаяся от температуры на коэффициент $k_\theta^{(X)}$; T — время оборота.

Силы $F^{(1)}$ и $F^{(3)}$ зависят от сближения задних граней инструмента с деталью и быстро возрастают по мере сближения, зависящего от кинематических значений задних углов. Их можно считать зависящими только от скоростей по направлениям X_1 и X_3, так как $\varphi = \pi/2$ и $\varphi_1 \Rightarrow 0$. Поэтому

$$F_0^{(3)}(t) = F_{3,0} \exp \alpha_2 [V_{0,3} - dX_3/dt]; F_0^{(1)}(t) = F_{1,0} \exp \alpha_3 [dX_{1,\theta}/dt - dX_1/dt], \quad (3)$$

где $F_{1,0}$ и $F_{3,0}$ — модули сил в области контакта при нулевой скорости упругих и тепловых деформаций; α_2 и α_3 — параметры, характеризующие крутизну увеличения сил в зависимости от скоростей в [с/мм].

Тогда уравнение динамики определяется (1)–(3).

При описании термодинамической подсистемы представим режущий инструмент как однопараметрический объект с сосредоточенной емкостью, в котором имеется источник производства тепла и описан механизм его отбора [19, 20]:

$$c_\theta M_\theta \frac{d\Xi}{dt} = Q_{вх} - Q_{вых}, \quad (4)$$

где c_θ — удельная теплоемкость в [Дж/^{0}С·кг]; M_θ — приведенная масса зоны резания в [кг]; $Q_{вх}$, $Q_{вых}$ — скорости производства и стока тепла в [Дж/с].

Известно [17–19], что производство тепла при резании определяется мощностью необратимых преобразований в областях первичной пластической деформации (0–0$^{(1)}$), контакта передней поверхности инструмента со стружкой (0–0$^{(2)}$) и задней грани с заготовкой (0–0$^{(3)}$). На рис. 1 стрелками показаны главные направления стоков тепла из зоны резания. В области (0–0$^{(1)}$) формируется количество тепла, эквивалентное энергии, затраченной на деформирование и разрушение при стружкообразовании и формировании поверхностного слоя. В области (0–0$^{(2)}$) производится тепло, эквивалентное работе сил трения при контакте передней поверхности режущего клина и деформированного материала. В области (0–0$^{(3)}$) формируется тепло, эквивалентное работе сил трения на задней поверхности инструмента. Если выделить основные источники производства тепла, то можно ограничиться областями 0–0$^{(1)}$ и 0–0$^{(2)}$, а сток тепла обобщить его зависимостью от эквивалентной площади срезаемого слоя. Принимая во внимание закон Фурье для стационарного состояния в дискретной форме, можно полагать, что сток тепла в единицу времени зависит от площади срезаемого слоя, градиента температуры по направлению теплообмена и коэффициента теплопроводности. Таким образом, упрощенное уравнение термодинамической системы для однопараметрического объекта с сосредоточенной емкостью, интерпретируемой как зона резания без раскрытия ее внутренней структуры, можно представить в виде

$$c_\theta M_\theta \frac{d\Xi}{dt} = c_M (N_1 + N_2) - \lambda \frac{\Delta\theta}{\Delta X} S, \quad (5)$$

где N_1, N_2 — мощности необратимых преобразований в зонах стружкообразования и контакта передней грани инструмента со стружкой; c_M — механический эквивалент тепла, следовательно, производство тепла в единицу времени выражается в [Дж/с]; λ — коэффициент теплопроводности [Дж/м·^{0}С]; $\frac{\Delta\theta}{\Delta X}$ — градиент температуры в дискретной форме; S — площадь срезаемого слоя.

Если при заданных технологических режимах пренебречь вариациями площади среза, параметрами процесса резания и рассматривать приращение температуры к температуре окружающей среды, равной нулю, то уравнение (5) можно представить:

$$T_\theta \frac{d\Xi}{dt} = k_\theta (N_1 + N_2) - \Xi, \quad (6)$$

где T_θ, — постоянная времени термодинамической подсистемы в [с], экспериментально определяемая по переходным процессам изменения температуры; k_θ — экспериментально определяемый коэффициент связи установившейся температуры с мощностью необратимых преобразований.

С учетом отмеченных выше допущений (6) является уравнением термодинамической подсистемы с постоянными параметрами. Следовательно, уравнение термодинамической подсистемы, в котором раскрыты источники про-

изводства тепла, усредненные условия теплообмена и изменение суммарной температуры в зоне резания без ее распределения в зонах резания и инструменте:

$$T_\theta d\Xi / dt = k_\theta \rho_0(\Xi)\{\chi_2(V_{2,0} - dX_2/dt) + \chi_3[(\phi)^{-1}V_{2,0} + V_{3,0} - dX_3/dt]\}\times \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow [t_P^{(0)} + X_{1,\theta}(t) - X_1(t)]\{\int_{t-T}^{t}[V_{3,0} - v_3(\xi)]d\xi\} - \Xi \quad , (7)$$

где $V_{2,0}$ — заданная скорость резания; ϕ — коэффициент усадки стружки.

В (7) не учитывается работа сил в области контактов задних граней инструмента, так как она на порядок меньше работы в области первичной пластической деформации и контакта передней грани со стружкой.

Для связи механической и термодинамической подсистем необходимо раскрыть зависимость $\rho_0(\Xi)$. Изучение взаимосвязи сил и температуры при различных скоростях резания (и, следовательно, мощности необратимых преобразований) позволяет экспериментально определить $\rho_0(\Xi)$. Главная особенность в скоростном диапазоне 0,2–2,0 м/с в том, что при увеличении производства тепла монотонно уменьшаются все составляющие сил резания, следовательно $\rho_0(\Xi)$. Для аппроксимации $\rho_0(\Xi)$ удобно воспользоваться зависимостью, основанной на известных экспериментальных данных [11, 12, 14, 21]:

$$\rho_0(\Xi) = \rho_{0,0}\{1 + \mu\exp(-\alpha_\theta\Xi)\}, \quad (8)$$

где $\rho_{0,0}$ — давление стружки с учетом температуры окружающей среды; μ — безразмерный коэффициент, определяющий изменение давления в области малых и высоких температур; α_θ — параметр в [$(^0C)^{-1}$], определяющий крутизну изменения давления при увеличении температуры.

Таким образом, динамика системы в целом определяется системами (1), (2), (3) и (7), которые взаимосвязаны между собой, то есть в дискретной форме (на макроуровне) раскрывают особенности теплового и механического взаимодействий в системе резания.

Свойство равновесия. Рассмотрим равновесие в подвижной системе координат, движение которой определяется постоянными скоростями исполнительных элементов. При этом учтем, что в равновесии X_1^*, X_2^*, X_3^* и Ξ^* выполняются условия: $X_1^* = \text{const}, X_2^* = \text{const}, X_3^* = \text{const}$, $X_3^*(t) = X_3^*(t-T)$ и $\Xi^* = \text{const}$. Следовательно, производство тепла равно его оттоку в единицу времени. Тогда

$$\begin{cases} c_{1,1}X_1^* + c_{2,1}X_2^* + c_{3,1}X_3^* = \chi_1\rho_{0,0}S_P^{(0)}[1 + \mu\exp(-\alpha_\theta\Xi^*)]t_{P,\Sigma} + F_{1,0}; \\ c_{1,2}X_1^* + c_{2,2}X_2^* + c_{3,2}X_3^* = \chi_2\rho_{0,0}S_P^{(0)}[1 + \mu\exp(-\alpha_\theta\Xi^*)]t_{P,\Sigma}; \\ c_{1,3}X_1^* + c_{2,3}X_2^* + c_{3,3}X_3^* = \chi_3\rho_{0,0}S_P^{(0)}[1 + \mu\exp(-\alpha_\theta\Xi^*)]t_{P,\Sigma} + F_{3,0}\exp(\alpha_2 V_{0,3}); \\ \Xi^* = k_\theta\rho_{0,0}S_P^{(0)}V_\theta t_{P,\Sigma}[1 + \mu\exp(-\alpha_\theta\Xi^*)], \end{cases} \quad (9)$$

где $V_\theta = \{\chi_2 V_{2,0} + \chi_3[(\phi)^{-1}V_{2,0} + V_{3,0}]\}$ — эффективная скорость; $t_{P,\Sigma} = t_P^{(0)} + k_\theta^{(X)}\Xi^* - X_1^*$ — установившееся значение припуска в точке равновесия.

Система (9) в диапазоне реального изменения параметров имеет единственное решение, так как всегда выполняется условие $t_P^{(0)} \rangle (X_1^* - k_\theta^{(X)}\Xi^*)$.

Для определения устойчивости X_1^*, X_2^*, X_3^*, Ξ^* необходимо рассмотреть линеаризованное уравнение в вариациях относительно точки равновесия [18]. Тогда после замены $X_1(t) = X_1^* + x_1(t)$, $X_2(t) = X_2^* + x_2(t)$, $X_3(t) = X_3^* + x_3(t)$, $\Xi(t) = \Xi^* + \theta(t)$ получаем линеаризованное уравнение в вариациях:

$$M\frac{d^2x}{dt^2} + H\frac{dx}{dt} + Cx = 0, \quad (10)$$

где $M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $H = \begin{bmatrix} h_{1,1}+F_{0,1}\alpha_1 & h_{2,1} & h_{3,1} & 0 \\ h_{1,2} & h_{2,2} & h_{3,2} & 0 \\ h_{1,3} & h_{2,3} & h_{3,3} & 0 \\ 0 & k_\theta h_{x_2} & -k_\theta h_{x_3} & T_\theta \end{bmatrix}$; $C = \begin{bmatrix} c_{1,1}+\chi_1\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} k_\theta^{(x)} \\ c_{1,2}+\chi_2\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} k_\theta^{(x)} \\ c_{1,3}+\chi_3\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} k_\theta^{(x)} \\ k_\theta c_{x_1} & 0 & k_\theta c_{x_3} & (1-k_\theta c_\theta) \end{bmatrix}$;

$x = \{x_1, x_2, x_3, \theta\}^T$; $\chi_\theta = [1+\mu\exp(-\alpha_\theta \Xi^*)]$; $c_\theta = \rho_0 S_P^{(0)} V_\theta [\chi_\theta k_\theta^{(x)} - t_{P,\Sigma}\alpha_\theta \exp(-\alpha_\theta \Xi^*)]$ — параметр мощности необратимых преобразований в $\left[\dfrac{\text{кг}\cdot\text{мм}}{^0\text{С}\cdot\text{с}}\right]$; k_θ — параметр связи мощности необратимых преобразований с производством температуры в $\left[\dfrac{^0\text{С}\cdot\text{с}}{\text{кг}\cdot\text{мм}}\right]$; $c_{x_1} = \rho_0\chi_\theta S_P^{(0)} V_\theta$ и $c_{x_2} = \rho_0\chi_\theta t_{P,\Sigma} V_\theta$ — коэффициенты в $\left[\dfrac{\text{кг}}{\text{с}}\right]$;

$h_{x_2} = \rho_0\chi_\theta t_{P,\Sigma} S_P^{(0)} (\chi_2 + \phi^{-1}\chi_3)$ и $h_{x_3} = \rho_0\chi_\theta t_{P,\Sigma} S_P^{(0)} \chi_3$ — коэффициенты в [кг].

Таким образом, на устойчивость равновесия кроме параметров механической подсистемы оказывают влияние параметры термодинамической подсистемы и коэффициенты связи между ними. Рассмотрим пример влияния параметров термодинамической подсистемы на устойчивость равновесия. Параметры механической подсистемы: $m = 0{,}8\cdot 10^3$, кг·с^2/мм ; элементы матриц h и c приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Параметры механической подсистемы: $m = 0{,}8\cdot 10^3$, кг·с^2/мм ; элементы матриц h и с

Mechanical subsystem parameters: $m = 0{,}8\cdot 10^3$, кг·с^2/мм *; array elements h and* с

$h_{1,1}$, кг·c / мм	$h_{2,2}$, кг·с/мм	$h_{3,3}$, кг·с/мм	$h_{1,2} = h_{2,1}$, кг·с/мм	$h_{1,3} = h_{3,1}$, кг·с/мм	$h_{2,3} = h_{3,2}$, кг·с/мм
0,25	0,15	0,15	0,1	0,08	0,08
$c_{1,1}$, кг/мм	$c_{2,2}$, кг/мм	$c_{3,3}$, кг/мм	$c_{1,2} = c_{2,1}$, кг/мм	$c_{1,3} = c_{3,1}$, кг/мм	$c_{2,3} = c_{3,2}$, кг/мм
1000	800	400–5000	200	100	100

Параметры динамической связи процесса резания и термодинамической подсистемы соответственно приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2
Table 2

Параметры динамической связи процесса резания
Dynamic linking parameters of cutting process

ρ_0, кг/мм^2	α_1, с/м/	α_2, с/м/	$F_{0,1}$, / кг	$F_{0,3}$, / кг
(100-700)	(0,2-0,5)	(0,2-0,5)	0,5	0,5

Таблица 3
Table 3

Параметры термодинамической подсистемы
Thermodynamic subsystem parameters

k_θ, ^{0}С·с/кг·мм	μ	ϕ	$k^{(x)}{}_\theta$, мм/^{0}С·	T_θ, с·	α_θ, $(^0\text{С})^{-1}$
6·10^{-3}	0,5	1,5	(1-2)10^{-3}	(0,01-0,1)	(0,001-0,05)

Будем анализировать влияние на механическую систему термодинамической подсистемы при постоянных технологических режимах. В приведенных таблицах указаны диапазоны изменения некоторых параметров, рассматриваемых с точки зрения их влияния на устойчивость. Вначале проанализируем свойство равновесия, то есть зависимость X_1^*, X_2^*, X_3^* и Ξ^* от технологических режимов V_θ , $S_P^{(0)}$, $t_{P,\Sigma}$. На рис. 2 приведен пример изменения координат X_1^*, X_2^*, X_3^* и Ξ^* при врезании инструмента в заготовку.

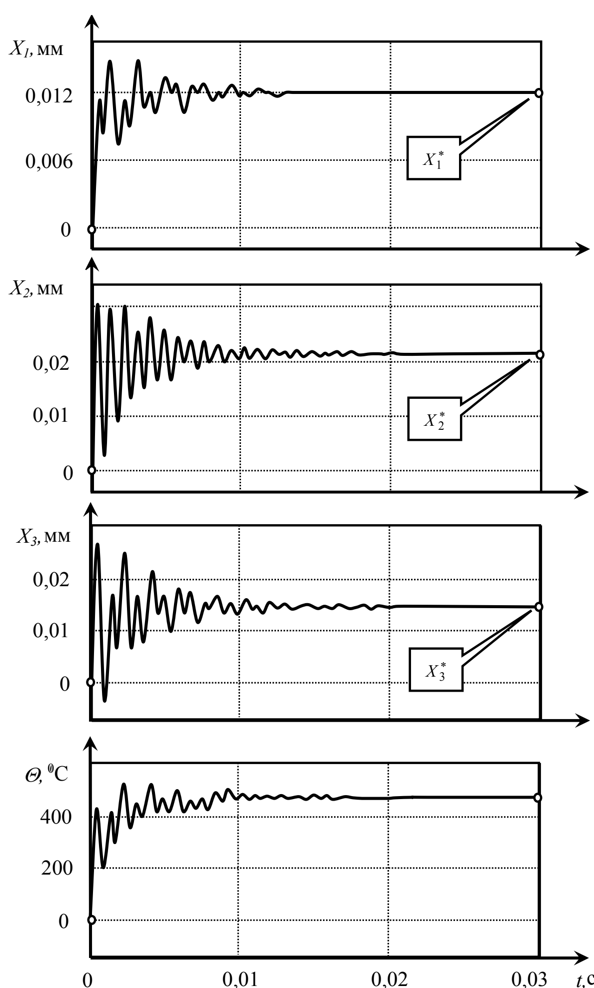
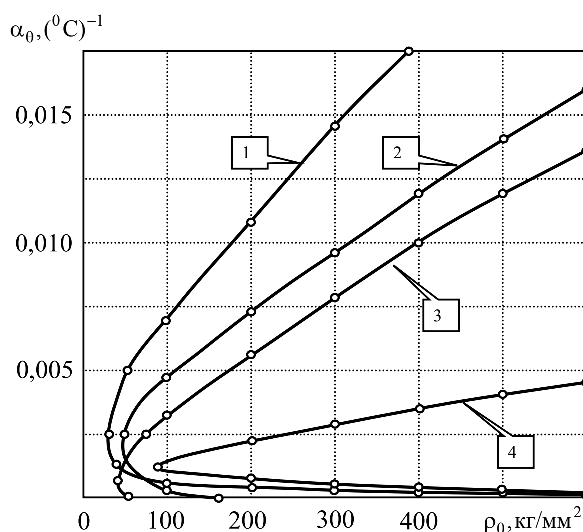


Рис. 2. Пример переходных процессов деформационных смещений и температуры при врезании инструмента

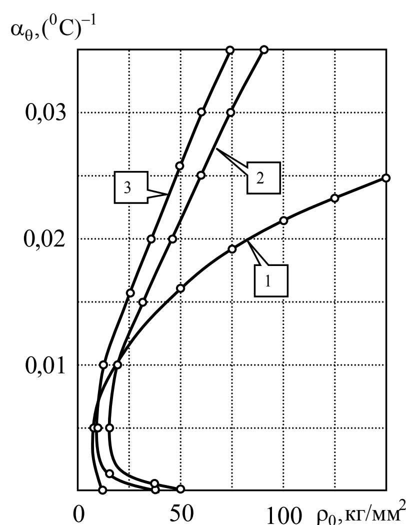
Fig. 2. Example of transient processes of deformation displacements and temperature under tool insertion

Здесь хорошо заметна взаимосвязь изменения температуры Ξ^* и деформационных смещений (X_1^*, X_2^*, X_3^*), свидетельствующая о единстве процессов в механической и термодинамической подсистемах. Не останавливаясь на деталях, отметим главные особенности влияния технологических режимов на температуру. Во-первых, по мере увеличения скорости резания температура возрастает монотонно, но не пропорционально. Это связано с тем, что за счет влияния температуры параметр $\rho_0(\Xi)$ в установившемся состоянии по мере увеличения скорости уменьшается. Это влияние так называемого температурно-скоростного фактора. Во-вторых, вариации величин подачи и припуска мало влияют на установившиеся значения температуры. В этом случае, например, при увеличении подачи одновременно возрастает эффективная площадь срезаемого слоя. Поэтому увеличивается и отток тепла. При анализе устойчивости будем рассматривать области устойчивости в параметрическом пространстве. Анализ показывает, что на устойчивость системы со стороны термодинамической подсистемы оказывают наиболее существенное влияние следующие параметры: T_θ, k_θ, α_θ, $k_\theta^{(X)}$. При этом области устойчивости зависят от матриц h, c в динамической подсистеме инструмента.

Во всех случаях при увеличении элементов матрицы h области устойчивости расширяются. Что касается матрицы c, то в ней наиболее существенное влияние на область устойчивости оказывает параметр $c_{3,3}$. На рис. 3 приведен пример изменения областей устойчивости в плоскости $\alpha_\theta - \rho_0$ для случая, когда $k_\theta^{(X)} = 0$.



a)



b)

Рис. 3. Области устойчивости в плоскости $\rho_0 - \alpha_\theta$, : кривая 1 при $T_\theta = 0.01$ с , $c_{3,3} = 5000$кг/мм , кривая 2 при $T_\theta = 0.05$ с , $c_{3,3} = 5000$кг/мм , кривая 3 при $T_\theta = 0.1$ с , $c_{3,3} = 5000$кг/мм , кривая 4 при $T_\theta = 0.4$ с , $c_{3,3} = 5000$кг/мм (а); кривая 1 при $T_\theta = 0.02$ с , $c_{3,3} = 5000$кг/мм , кривая 2 при $T_\theta = 0.02$ с , $c_{3,3} = 1000$кг/мм , кривая 3 при $T_\theta = 0.02$ с , $c_{3,3} = 400$кг/мм (б)

Fig. 3. Stability areas in $\rho_0 - \alpha_\theta$, *plane: curve 1 at* $T_\theta = 0.01$ c , $c_{3,3} = 5000$kg/mm, *curve 2 at* $T_\theta = 0.05$ c $c_{3,3} = 5000$kg/mm, *curve 3 at* $T_\theta = 0.1$ c , $c_{3,3} = 5000 kg/mm$, *curve 4 at* $T_\theta = 0.4$ c , $c_{3,3} = 5000$kg/mm *(a); curve 1 at* $T_\theta = 0.02$ c , $c_{3,3} = 5000$kg/mm, *curve 2 at* $T_\theta = 0.02$ c , $c_{3,3} = 1000$ kg/mm , *curve 3 at* $T_\theta = 0,02$ c , $c_{3,3} = 400$kg/mm *(b)*

Что касается коэффициентов $k_\theta^{(X)}$, k_θ , то их увеличение во всех случаях приводит к расширению областей неустойчивости.

Приведем пример изменения области устойчивости в плоскости варьируемых параметров $\rho_0 - k_\theta^{(X)}$ (рис. 4).

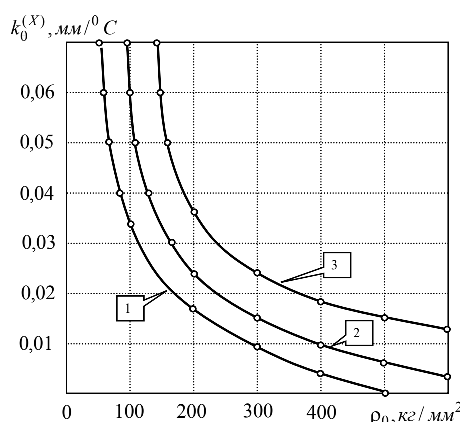


Рис. 4. Области устойчивости в плоскости $\rho_0 - k_\theta^{(X)}$: 1 — $T_\theta = 0{,}005$ с , 2 — $T_\theta = 0{,}02$ с , 3 — $T_\theta = 0{,}2$ с

Fig. 4. Stability areas in $\rho_0 - k_\theta^{(X)}$ *plane: 1 -* $T_\theta = 0{,}005$ с *, 2 -* $T_\theta = 0{,}02$ с *, 3 -* $T_\theta = 0{,}2$ с

Во всех случаях на рис. 3 и 4 система устойчива слева от приведенных линий. Мы видим, что для каждого значения параметра ρ_0 , характеризующего среднее давление стружки на переднюю поверхность инструмента, существует предельное значение $k_\theta^{(X)}$, при котором система теряет устойчивость равновесия.

Анализ результатов. Если следовать синергетическому принципу анализа динамических систем, взаимодействующих через различные среды, то необходимо силы взаимодействия представить в координатах состояния. В данном случае это силы резания [14–16, 22]. Очевидно, что формирование сил резания нельзя объяснить только механической природой. На законы формирования сил резания не в меньшей степени влияют термодинамические процессы, а многие особенности динамических явлений при резании можно объяснить только на основе единства связанных подсистем: механической и термодинамической. Приведенный выше материал показывает, что такая категория динамики, как устойчивость равновесия, зависит не только от рассмотрения механических параметров (матриц инерционных, скоростных, упругих коэффициентов и сил, зависящих от них). Устойчивость равновесия зависит также от термодинамических параметров, определяемых мощностью необратимых преобразований в зоне резания (производства тепла). Кроме того, она определяется законами теплообмена, имеющими различную природу. Механическая и термодинамическая подсистемы в совокупности характеризуются нелинейными связями, а система является открытой в термодинамическом смысле.

Из приведенного материала следует, что термодинамическая подсистема оказывает противоречивое влияние на устойчивость точки равновесия в динамической системе резания. Известно, что один из механизмов потери устойчивости равновесия связан со свойством процесса резания, заключающимся в уменьшении сил при увеличении скорости резания в скоростном диапазоне 0,2–2,0 м/с [13, 14]. В этом случае вариации скорости деформационных смещений в направлении скорости резания формируют положительную обратную связь, способствующую потере устойчивости равновесия. Объяснение уменьшения сил резания при возрастании скорости связано с необратимыми преобразованиями подводимой энергии к зоне резания, то есть с законами термодинамики. Здесь увеличение скорости приводит к возрастанию мощности необратимых преобразований в зоне резания, вызывающей, в частности, увеличение производства тепла в зоне обработки. Такой закон, формирующий в реакции со стороны процесса обработки положительную обратную связь, получен экспериментально для установившегося процесса обработки. Однако, как показано выше в зависимости (8), изменение мощности необратимых преобразований при резании вызывает не мгновенное изменение температуры и связанных с ним свойств процесса резания.

Приведенные на рис. 3, а области показывают, что в зависимости от постоянной времени термодинамической подсистемы T_θ изменяются фигуративные линии в плоскости варьируемых параметров. Причем при увеличении T_θ они, как правило, приводят к расширению области устойчивости. Это связано с тем, что по мере увеличения частоты вариаций скорости не только уменьшается амплитуда вариаций температуры резания, но и вводится дополнительное затухание в систему. Это затухание уменьшает чувствительность вариаций сил, вызванных изменениями колебательной скорости деформационных смещений инструмента в направлении скорости резания. Таким образом, первая тенденция влияния термодинамических процессов на устойчивость характеризуется тем, что термодинамические процессы потенциально направлены на стабилизацию равновесия.

Важное свойство процесса резания, вызывающее потерю устойчивости точки равновесия системы, описано законом формирования новой поверхности резания и зависит от расположения этой поверхности на предыдущем обороте. Это так называемый регенеративный фактор [3, 12, 15]. Его влияние также уменьшается при возрастании инерционности термодинамической подсистемы. Однако эта связь, способствующая потере устойчивости, образуется че-

рез скорости упругих деформационных смещений в направлении оси X_3. Именно поэтому при увеличении коэффициента жесткости $c_{3,3}$ мы наблюдаем некоторое уменьшение области неустойчивого поведения равновесия (рис. 3, б).

На устойчивость равновесия принципиальное влияние оказывает коэффициент $k_{\theta}^{(X)}$, через который в системе формируется положительная обратная связь. Здесь необходимо учитывать, что при возрастании сил резания за счет температурных деформаций наблюдается не уменьшение, а увеличение площади срезаемого слоя и, как следствие, приращение сил. Исследования показывают (рис. 4), что даже при малых значениях коэффициента $k_{\theta}^{(X)}$ динамическая система резания может потерять устойчивость равновесия.

Вместе с тем термодинамическая подсистема вызывает дополнительное запаздывание изменения сил резания по отношению к деформационным смещениям. Причем в запаздывании принимают участие мультипликативные члены деформационных смещений и их скоростей, то есть преобразование деформационных смещений в силы определяется нелинейным запаздыванием, которое описывается достаточно сложным законом формирования притягивающих множеств в окрестности равновесия системы. Обычно при потере устойчивости в окрестности равновесия формируется притягивающее множество типа предельного цикла (рис. 5, а).

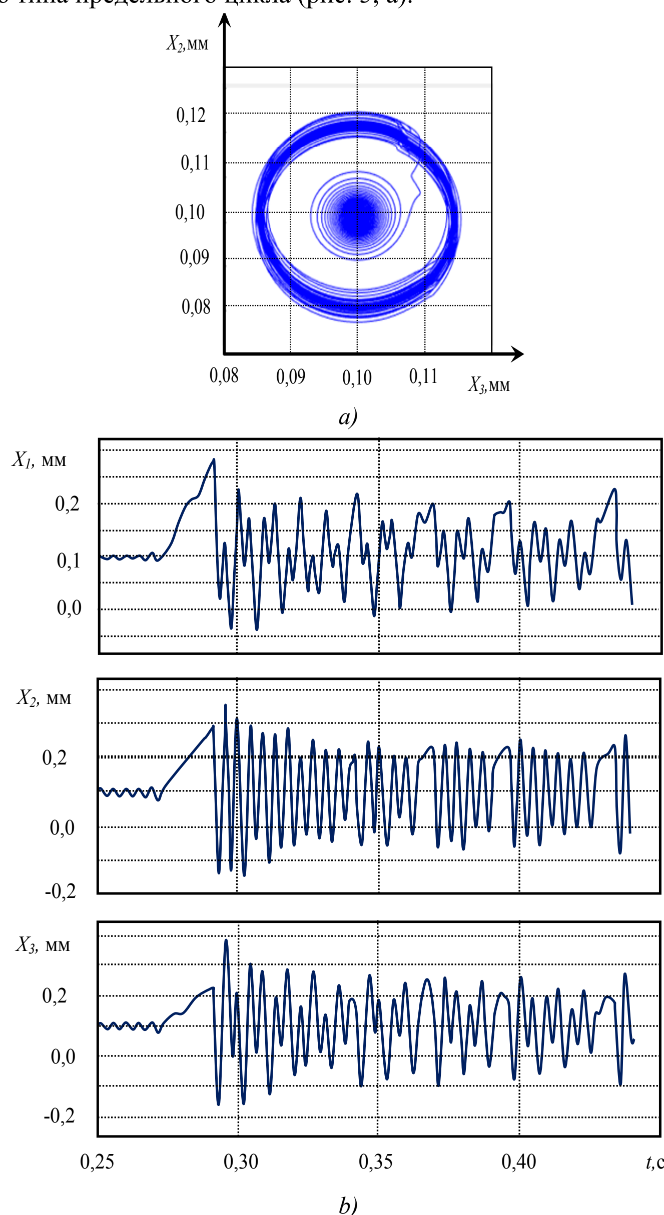


Рис. 5. Пример преобразования предельного цикла (*a*) в траекторию типа хаотической динамики (*b*)

Fig. 5. Example of transforming limit cycle (a) into trajectory of chaotic dynamics type (b)

Однако если увеличить коэффициент $k_{\theta}^{(X)}$, то в системе спонтанно формируется хаотическая динамика. Вариации деформационных смещений при этом во много раз превышают их значения при автоколебаниях (рис. 5).

Заметим, что без учета термодинамической подсистемы в рассматриваемой модели хаотические колебания не образуются.

Заключение. Термодинамические свойства процесса резания, зависящие от законов необратимых преобразований в зоне обработки и условий теплообмена с окружающей средой, изменяют динамическую систему резания. Как правило, термодинамические процессы в зоне резания направлены на стабилизацию равновесия системы. Однако возможны вариации параметров термодинамической подсистемы, при которых в динамической системе резания не только стабилизируется равновесие, но и в окрестности равновесия формируется хаотическая динамика со значительными колебательными смещениями, влияющими на качество образуемой резанием поверхности. Поэтому при проектировании системы резания кроме традиционных характеристик необходимо выбирать рациональные термодинамические параметры.

Библиографический список

1. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустый. —Москва : Машгиз, 1956. —395 с.

2. Tobias, S.-A. Machine Tool Vibrations / S.-A. Tobias. — London : Blackie, 1965. — 350 p.

3. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — Москва : Машиностроение, 1967. — 359 с.

4. Zakovorotny, V. L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools / V. L. Zakovorotny // WSEAS. Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. — 2015. —Vol. 10. — P. 102–116.

5. Заковоротный, В. Л. Влияние изгибных деформаций инструмента на самоорганизацию и бифуркации динамической системы резания металлов / В. Л. Заковоротный, Д.-Т. Фам, В. С. Быкадор // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. — Т. 22, № 3. — С. 40–52.

6. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of cutting / V. L. Zakovorotny [et al.] // Journal of Sound and Vibration. — 2016. — Т. 368. — С. 174–190.

7. Заковоротный, В. Л. Использование синергетической концепции для изучения устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 4. — С. 32–40.

8. Заковоротный, В. Л. Условия параметрического самовозбуждения динамической системы фрезерования концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 6. — С. 10–16.

9. Заковоротный, В. Л. Притягивающие множества при фрезеровании концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 8. — С. 27–33.

10. Заковоротный, В. Л. Параметрическое самовозбуждение динамической системы резания / В. Л. Заковоротный, Т.-Х. Фам // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 13, № 5–6 (74). — С. 97–103.

11. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь) / В. Л. Заковоротный [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 2 (53). — С. 137–146.

12. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В. Л. Заковоротный [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 3 (54). — С. 301–311.

13. Мурашкин, Л. С. Прикладная нелинейная механика станков / Л. С. Мурашкин, С. Л. Мурашкин. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 192 с.

14. Заковоротный, В. Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек. — Ростов-на-Дону : Терра, 2006. — 880 с.

15. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A. M. Gouskov [et al.] // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. — 2002. — Vol. 7. — P. 207

16. Хакен, Г. Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии / Г. Хакен. — Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. — 320 с.

17. Рыжкин, А. А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2005. — 311 с.

18. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. — Москва : Гостехиздат, 1950. — 472 с.

19. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. — Москва : Машиностроение, 1990. — С. 187–190.

20. Леонова, В. Ф. Термодинамика / В. Ф. Леонова. — Москва : Высшая школа, 1968. — 158 с.

21. Макаров, А. Д. Износостойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. — Москва : Машиностроение, 1966. — С. 236–237.

22. Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А. А. Колесникова. — Москва : Физматлит, 2004. — 504 с.

References

1. Tlusty, I. Avtokolebaniya v metallorezhushchikh stankakh. [Self-oscillations in machine tools.] Moscow: Mashgiz, 1956, 395 p. (in Russian).

2. Tobias, S.-A. Machine Tool Vibrations. London: Blackie, 1965, 350 p.

3. Kudinov, V.A. Dinamika stankov. [Machine dynamics.] Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p. (in Russian).

4. Zakovorotny, V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2015, vol. 10, pp. 102–116.

5. Zakovorotny, V.L., Pham D.-T., Bykador, V.S. Vliyanie izgibnykh deformatsiy instrumenta na samoorganizatsiyu i bifurkatsii dinamicheskoy sistemy rezaniya metallov. [Influence of a flexural deformation of a tool on self-organization and bifurcations of dynamical metal cutting system.] Izvestia VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 40–53 (in Russian).

6. Zakovorotny, V.L., et al. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. Journal of Sound and Vibration, 2016, vol. 368, pp. 174-190.

7. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Ispol'zovanie sinergeticheskoy kontseptsii dlya izucheniya ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya. [Use of synergetic concept for studying stability of forming trajectories of climb cutting.] STIN, 2016, no. 4, pp. 32–40 (in Russian).

8. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Usloviya parametricheskogo samovozbuzhdeniya dinamicheskoy sistemy frezerovaniya kontsevymi frezami. [Conditions for parametric self-excitation of dynamic end milling system.] STIN, 2016, no. 6, pp. 10–16 (in Russian).

9. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Prityagivayushchie mnozhestva pri frezerovanii kontsevymi frezami. [Attracting sets under end milling.] STIN, 2016, no. 8, pp. 27–333(in Russian).

10. Zakovorotny, V.L., Pham D.T. Parametricheskoe samovozbuzhdenie dinamicheskoy sistemy rezaniya. [Parametric self-excitation of cutting dynamic system.] Vestnik of DSTU, 2013, vol. 13, no. 5/6 (74), pp. 97–103 (in Russian).

11. Zakovorotny, V. L., et al. Modelirovanie dinamicheskoy svyazi, formiruemoy protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (skorostnaya svyaz'). [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (velocity coupling).] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 1, no. 2 (53), pp. 137–146 (in Russian).

12. Zakovorotny, V. L., et al. Modelirovanie dinamicheskoy svyazi, formiruemoy protsessom tocheniya (pozitsionnaya svyaz'). [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (positional coupling).] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 3 (54), pp. 301–311 (in Russian).

13. Murashkin, L.S., Murashkin, S.L. Prikladnaya nelineynaya mekhanika stankov. [Applied nonlinear machine mechanics.] Leningrad: Mashinostroenie, 1977. — 192 c. (in Russian).

14. Zakovorotny, V.L., Flek, M.F. Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskiy podkhod. [Cutting process dynamics. Synergetic approach.] Rostov-on-Don: Terra, 2006, 880 p. (in Russian).

15. Gouskov, A.M., et al. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2002vol. 7, p. 207.

16. Haken, G. Tayny prirody. Sinergetika: uchenie o vzaimodeystvii. [Secrets of Nature. Synergetics: Doctrine of Interaction.] Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Sciences, 2003, 320 p. (in Russian).

17. Ryzhkin, A.A. Teplofizicheskie protsessy pri iznashivanii instrumental'nykh rezhushchikh materialov. [Thermophysical processes under cutting tool materials wear.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2005, 311 p. (in Russian).

18. Lyapunov, A.M. Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya. [General problem on dynamic stability.] Moscow: Gostekhizdat, 1950, 472 p. (in Russian).

19. Reznikov, A.N., Reznikov, L.A. Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh. [Thermal processes in technological systems.] Moscow: Mashinostroenie, 1990, pp. 187–190 (in Russian).

20. Leonova, V.F. Termodinamika. [Thermodynamics.] Moscow: Vysshaya shkola, 1968, 158 p. (in Russian).

21. Makarov, A.D. Iznosostoykost' rezhushchikh instrumentov. [Cutting tools wear resistance.] Moscow: Mashinostroenie, 1966, pp. 236–237 (in Russian).

22. Kolesnikov, A.A., ed. Sinergetika i problemy teorii upravleniya. [Synargetics and control theory problems.] Moscow: Fizmatlit, 2004, 504 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 11.04.2017
Сдана в редакцию 11.04.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 11.04.2017
Submitted 11.04.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Заковоротный Вилор Лаврентьевич,
профессор кафедры "Автоматизация производственных процессов" Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-000-2187-9897
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Винокурова Ирина Андреевна,
магистрант кафедры "Автоматизация производственных процессов" Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-0215-7752
irina_24032011@mail.ru

Authors:

Zakovorotny, Vilor L.,
professor of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-000-2187-9897
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Vinokurova, Irina A.,
Master of Science of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0215-7752
irina_24032011@mail.ru